中国交通干线风沙危害防治模式及应用

李生宇[1,2,3,4,6] 雷加强[1,2,4,6*] 徐新文[1,2,4,6] 屈建军[5,6] 任宏晶[1,2,3,4]

1 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室 乌鲁木齐 830011
2 中国科学院新疆生态与地理研究所 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心 乌鲁木齐 830011
3 中国科学院新疆生态与地理研究所 莫索湾沙漠研究站 石河子 832000
4 中国科学院新疆生态与地理研究所 塔克拉玛干沙漠研究站 库尔勒 841000
5 中国科学院西北生态环境资源研究院 兰州 730000
6 中国科学院大学 北京 100049

摘要 公路和铁路是重要的陆地交通基础设施。我国风沙地区交通干线风沙危害的防治一直是国民经济和社会发展中的大事。针对我国风沙环境特征，面向铁路、公路安全运营的需求，我国开展了大量的交通干线风沙危害试验研究和防治实践，在防沙材料、防沙措施、防沙体系、维护管理等方面进行了系统创新，创建了4种不同风沙环境地区交通干线风沙危害防治模式，并在包兰铁路、青藏铁路、塔里木沙漠公路、准噶尔沙漠明渠等工程中得到成功应用。中国的交通干线风沙危害防治技术成果在世界干旱沙区尤其是“一带一路”沿线区域具有广阔的应用前景。

关键词 公路，铁路，风沙危害，防沙措施，防沙体系

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045. 20200430002

道路交通是文明和生产力的重要标志[1]，与人类生存和发展息息相关，同时作为一种地面构筑物，也受到区域多种自然条件的影响。风沙活动为一种气固两相流现象[2]，主要发生在干旱半干旱地区，以及半湿润地区的河湖沿岸、沿海地区。中国沙区大多分布在内陆巨大山间盆地和广阔的高平原上，从西北、华北到东北地区呈一弧形条带，东西绵延约4 000 km，南北宽约60 km，总面积达1.308×10^6 km^2，约占国土面积的13.6%[3]。

18 世纪工业革命后，现代化道路（公路和铁路）的出现极大地促进了人类的发展[1]。截至2019年底，中国公路总里程达4.8465×10^6 km，其中高速公

*通讯作者
资助项目：国家重点研发计划（2017YFE0109200），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20030202）
修改稿收到日期：2020年5月25日

路1.426×10^5 km；铁路营业里程达1.39×10^5 km，其中高铁3.5×10^4 km[4]。20世纪50—80年代，伴随着交通干线的建设，中国在干旱半干旱地区的沙漠、沙漠边缘、戈壁等地开展了道路沙害防治工作，尤其是包兰铁路沙坡头段沙害防治[5,6]，为交通干线沙害防治积累了宝贵的经验和技术[7,8]。20世纪80—90年代，随着塔里木盆地油气资源勘探开发，我国成功修筑了纵贯塔克拉玛干沙漠的油田公路，攻克了流动沙漠公路风沙危害防治技术的难题[9,10]。2000年后，随着西部大开发战略的实施，沙区交通干线建设大规模开展，防沙技术得到逐步完善。2010年后，尤其是2013年“一带一路”倡议提出之后，沙区高速交通干线建设加快，防沙技术进一步得到提升[11-13]。

1 交通干线的风沙危害形式及防治原则

1.1 风沙危害形式

风沙活动可造成道路设施损害（如路基风蚀、涵洞堵塞、标识牌损坏等）、行车环境恶化（如路基积沙或沙埋、能见度变差）、车辆机械损坏（如零件磨损、外观破损）、车辆倾覆、人员伤亡和财产损失[14]，而通常所说的交通干线风沙危害形式仅限于风蚀及沙埋对交通设施的损害和对行车安全的威胁。

1.2 风沙危害防治原则

交通干线风沙危害防治应遵循以下原则：① 预防为主，防治结合；② 因地制宜，因害设防；③ 综合治理，充分发挥各种措施的效能[15]。在交通干线设计阶段，应制定科学合理的线路方案，绕避严重风沙危害区段，尽量使线路走向与区域主导风向平行或小角度相交，并修建适宜断面形式的路基[8,16]。

公路路面光滑平展，风沙流可以非堆积搬运形式通过。目前，高等级公路常采用的波形板护栏容易引起路面积沙[17]，故高等级公路防沙标准高于一般等级公路。而铁路道床（包括道砟、枕木、铁轨）粗糙起伏，易产生滞留积沙，不仅威胁交通安全，还易造成拱道危害[16]。因此，铁路防沙标准高于公路。

2 交通干线防沙体系的配置及维护

2.1 防沙措施和防沙原理

在防沙实践中，中国创造了多种防沙措施，风沙危害得到了有效防治。根据防沙材料性质，防沙措施一般可以分为机械措施、化学措施和生物措施；根据力学原理将防沙措施分为封闭型（如片石封闭路基边坡）、固定型（如草方格）、阻拦型（如高立式沙障、林带）、输导型（如下导风）、转向型（如羽毛排）、消散型（如扬沙堤）等6类[18]。不同防沙措施的作用原理主要包括：阻断或抑制风沙气固两相流与地面的接触及相互作用；增加积沙体或地表抗风蚀能力；增加或减小风沙流局地运动阻力；引导改变风沙流运动方向等。

在防沙工程建设中，须综合考虑沙源、风况、地貌、降水、地下水位等因素，尤其要充分考虑防沙材料。防沙材料主要包括天然无机材料、植物秸秆、人工高分子合成材料、低等植物和高等植物等。鉴于工程造价和环保要求，防沙工程多倾向采用乡土材料。

2.2 防沙体系的结构配置模式

防沙措施沿交通干线的空间结构配置称为防沙体系。防沙体系不仅关系工程安全，而且决定了工程建设成本及后期运行维护成本，必须贯彻因地制宜、因害设防理念。

风沙环境复杂多样，根据风力强弱和沙源多少的组合情况，可定性地将其分为4类：弱风少沙型、弱风多沙型、强风少沙型、强风多沙型（表1）。相应地，沙区交通干线防沙体系可总结为4种结构模式：以固为主型、阻-固结合型、挡风输沙型、阻-固-输结合型（表1）。此外，当线路与当地主导风向夹角较小且有适宜的导沙区域（如沟壑、河谷）时，阻-固结合模式的外侧阻沙措施可变为导沙措施[19,20]，即调整为导-固结合型模式。

表 1　风沙环境定性分类及交通干线防沙模式

风沙环境	典型地区	主要危害要素	防沙体系模式	案例
弱风少沙型	古尔班通古特沙漠	局部活化流沙	以固为主	准东油田公路[21]、准噶尔沙漠明渠
弱风多沙型	塔克拉玛干沙漠	大量流沙	阻-固结合	塔里木沙漠公路[10]、阿拉尔-和田沙漠公路[22]
强风少沙型	百里风区	强风	挡风输沙	连霍高速公路百里风区段[23]、兰新（高）铁路百里风区段[24]
强风多沙型	台特玛湖干涸湖盆	高输沙伴随大风	阻-固-输结合	S214省道[25]

2.3 防沙体系的维护

沙区交通干线不仅要进行路基和路面的防风蚀维护管理[26]，也要重点开展防沙体系维护[27]。防沙体系功能会随着其发挥防风固沙作用而衰减[28]，防沙材料也会逐渐腐朽老化。为了延长防沙体系寿命，需要不断对其进行维护和更新。防沙功能衰减并非全都从防沙体系的迎风边缘向内部逐步推进，防沙体系内部地形起伏处也可同步发生风蚀和沙埋[29]。防沙体系越宽，其维护成本越高；且由于日常的小范围、多点维护不具规模效益，长期维护成本高于一次更新成本。因此，防沙体系的理论计算宽度[30]（多存在技术性的沙害夸大问题[31]）在经济学上并非最优，而适宜宽度的防沙体系长期更新成本更低，更符合实际。

3 交通干线防沙模式与成功案例

多年来，我国科技工作者针对不同区域环境条件和风沙危害特征，综合集成机械、化学和生物防护措施的优势[32]，合理配置、因地制宜，逐步构建和完善了沙区交通干线防沙体系，确保了道路的安全运营。

3.1 流动沙漠环境“四带一体”的风沙危害综合防治模式——包兰铁路

1958 年，包兰铁路建成通车，该线路在沙坡头段穿越腾格里沙漠东南缘。大面积格状流动沙丘由西北向东南倾斜，呈阶梯状分布；而铁路正处于沙丘阶梯下方，加之常年盛行西北偏西风和西北风，铁路走向大致与主风向呈 45° 夹角，沙丘副梁前移埋压造成严重的风沙危害[32,33]。

经过长期试验，初步建立了由高立式栅栏构成的前沿阻沙带、草方格与无灌溉植物结合的固沙带、灌溉条件下的乔灌木林带、砾石平台缓冲输沙带的阻、固、输、导“四带一体”的防沙体系[32,33]。因利用砾石平台输沙难以实现，林带灌溉也受水资源限制，经不断改进，形成 2 个基本条带，即：流沙迎风方向最前沿设立高立式栅栏构成阻沙区；设置半隐蔽式 1 m×1 m 草方格沙障和沙障内栽植一定密度的固沙植物，形成固沙林带区，最终建立了“以固为主，阻-固结合”的综合防沙体系[34]（图 1）。

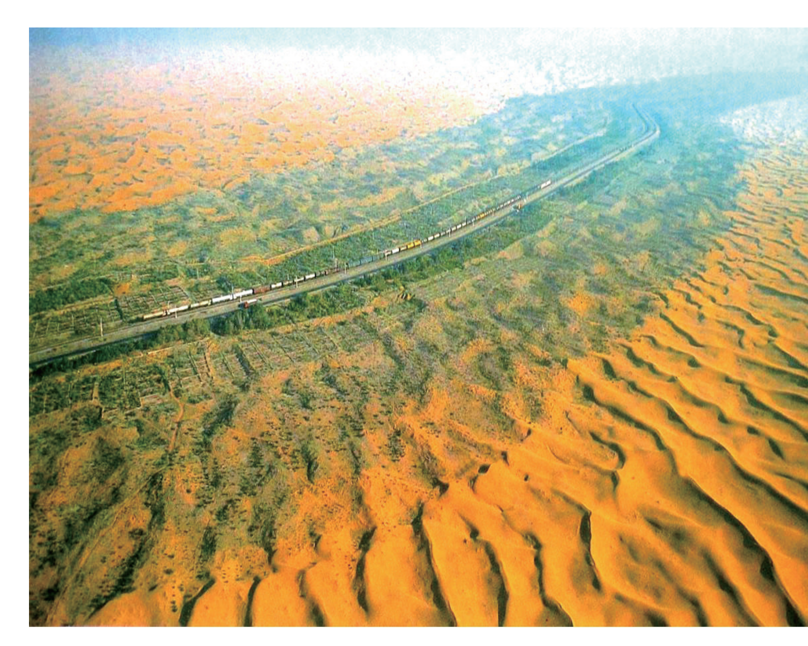


图 1　包兰铁路沙坡头段风沙危害防治工程

沙坡头防沙体系的建立和完善，有效控制了区内风沙活动[32]，防护效果良好。固沙区内近地表风速降低了 50% 以上、输沙量减少了近 80%，沙丘表面稳定[34]；格状沙丘上起初建立的灌木-半灌木人工林带逐渐演替为草本植物-半灌木天然植被，土壤结皮形成，藓类及一年生植物出现，生物固沙作用加强[34]；由于环境改善，植被区内出现了新的动、植物种，构成了一个稳定的固定沙地生态系统，并有由隐域性（流沙）地理环境向地带性地理环境（草原化荒漠）演变的趋势[34]。该防护体系积累了在流动沙漠中以工程固沙方法为主的沙害防治经验，成为我国流沙环境交通干线风沙危害防治的首个成功模式[32]。

3.2 高寒风沙环境大网格高立式沙障风沙危害防治模式——青藏铁路

2006 年建成通车的青藏铁路，是世界上第一条海拔最高、穿越多年冻土及沙漠的高原铁路。调查研究表明，该铁路沿线大部分地处高寒干旱半干旱区，而少雨多大风、风旱同期的气候状况为风沙活动提供了动力条件[34,35]。随着全球气候变化，青藏高原冰川退缩、多年冻土退化、冻融交替，导致地表土壤结构松散，沙源增多，风蚀沙化加剧[35]。此外，铁路修建等人类活动对原始地表扰动也逐渐增加。青藏铁路沿线风沙危害日趋严重，沙害路段达到 270 km[36]，风沙危害防治刻不容缓。

针对青藏铁路沿线不同区域自然环境特点和沙害持续加剧的现实，在沙源丰富地段建立了结合生物、化学措施，以机械措施为主的远阻近固、输导结合的综合防护体系[35,37]。研究表明，由于空气密度不同，与低海拔地区相比，高海拔低气压环境具有较高的起动摩阻风速，且跃移沙粒比重及跃移高度也相对增高[36]。依据高海拔区这一沙粒运动形式及风沙流结构特征，提出了通过增加工程措施布设高度以降风速、固流沙的思路，研发了大网格高立式沙障防沙关键技术[19,36]（图 2）。采用高密度聚乙烯（HDPE）高立式阻沙栅栏、大网格高立式固沙障、石方格、碎石压沙等机械措施，结合喷洒固沙剂、地表植被保护与恢复等措施，构建了适宜青藏铁路的风沙危害综合防治技术体系[32,34-39]。

基于高寒风沙环境大网格高立式沙障风沙危害防治技术，在青藏铁路沿线河谷型、季节性干湖盆型、退化草地型等沙源区，因地制宜布设了一系列防护措施[36]，使得风沙流得到有效控制，天然植被盖度达到 30% 以上，年累计清沙量大幅降低，目前仅 12 000 m^3[36]，防治成效明显。该模式填补了高寒风沙区交通干线沙害防治的研究空白，为高寒生态脆弱区风沙危害的科学防治提供了借鉴。

3.3 干旱流沙环境苦咸水灌溉造林模式——塔里木沙漠公路

20 世纪 90 年代，中国成功修建了纵贯塔克拉玛干沙漠的塔里木沙漠公路，对油气资源开发和新疆南疆经济发展发挥了重要作用[40]。塔克拉玛干沙漠气候极端干旱，公路沿线大部分路段盛行东北风，风力强劲；沙丘形态复杂多样，区域组合差异明显；流沙覆盖率高，沙源充足[41,42]。风沙危害成为沙漠公路安全运行的重要威胁[43,44]。

机械防沙体系可保障沙漠公路运行初期的安全[44]，但其寿命短，维护更新成本巨大。因此，建

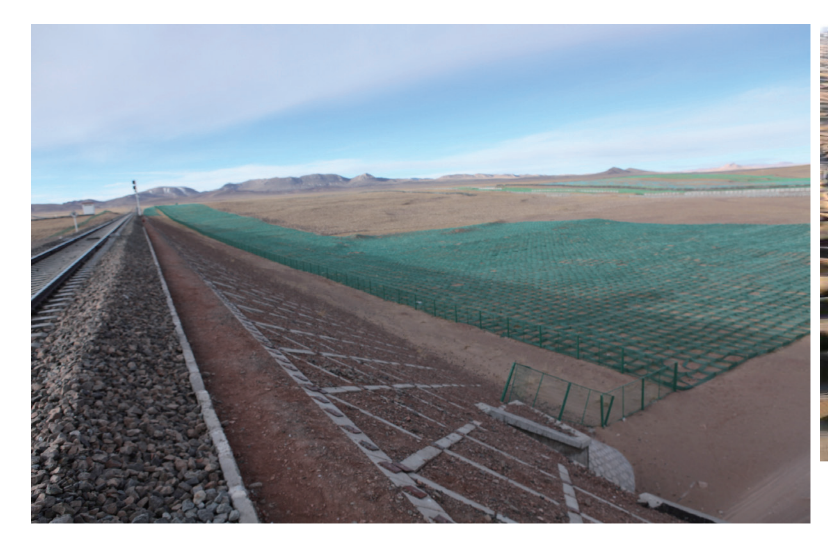


图 2　青藏铁路风沙危害防治工程

立以生物防沙为主体的防护林生态工程是确保沙漠公路长久畅通的最好选择。针对塔里木沙漠公路沿线淡水资源匮乏、盐分积累、风沙土保水能力差等不利条件，将土壤类型、植物种类、灌溉周期、灌溉方式、灌溉定额有机结合，确立了科学灌溉制度[45]（造林初期柽柳、梭梭灌水定额 30 kg/株，灌溉周期 15—20 天；沙拐枣灌水定额 20 kg/株，灌溉周期 10—15 天；随着林龄增加灌溉量适当增加，灌溉周期相应延长[46,47]），创建了咸水灌溉育苗规程，形成流动沙地苦咸水灌溉条件植物育苗技术①；提出了高位打井、相对均匀布井（井间距 4 km）、分支管供水（根据植物耗水特征实现差异供水灌溉）、补偿式滴灌（压力补偿式小流量滴头灌溉）和少灌勤灌、年末压盐的苦咸水灌溉关键技术体系[45,48]。

研发形成的流动沙地苦咸水灌溉造林技术成果直接应用于塔里木沙漠公路防护林生态工程建设之中，建成了全长 436 km、总体宽度 72—78 m 的人工绿色走廊[45]（图 3），林带面积 3 128 hm^2，种植苗木 2 000 余万株，成活率 85% 以上，从而根治了沙漠公路风沙危害，确保了公路安全畅通。该技术模式拓展了生态建设的可利用水资源，突破了“非宜林区”的造林禁忌，为极端干旱区风沙危害防治和生态恢复重建提供了成功范例，在国内外得到广泛关注。

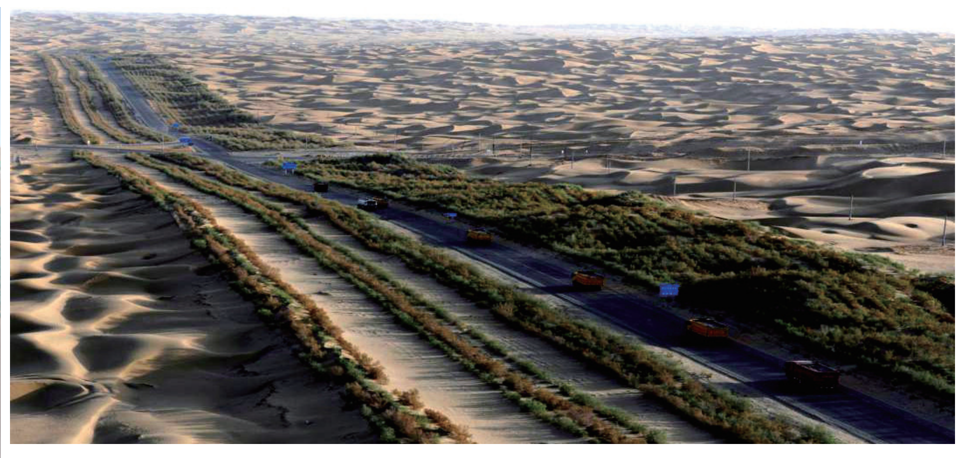


图 3　塔里木沙漠公路防护林生态工程

3.4 活化沙丘环境无灌溉造林模式——准噶尔沙漠明渠

21 世纪初，国家投资实施了天山北坡经济带水资源工程，其中准噶尔沙漠明渠段及伴行公路穿越古尔班通古特沙漠。沙漠明渠沿线降水量少，蒸发量大，无任何灌溉水源[49]；风力强劲，风向单一；由于工程扰动，植被遭到破坏，活化沙丘严重威胁渠道和公路安全。

古尔班通古特沙漠冬季有稳定积雪，降雪约占年降水量的 30%[49]；春季积雪融化，79%—92% 的蓄存水转化为土壤水分，形成悬湿沙层[50,51]。经试验研究，创立了利用悬湿沙层土壤水分在固定、半固定沙地进行无灌溉造林的关键技术[52]。该技术体系主要涉及 10 余个适宜植物种（如梭梭、白梭梭、沙拐枣、沙枣、文冠果、紫穗槐、花棒、刺沙蓬、盐生草、沙米、沙蒿、绢蒿等）、2 个种植时段（晚秋和早春）、2 种造林方法（植苗和直播）、2 种处理方式（保水剂蘸根处理和客沙造林）、3 种结构布局（株行距分别为 2 m×2 m、2 m×1 m 和 1 m×1 m）、4 种立地条件（填方段阴坡、填方段阳坡、挖方段阴坡、挖方段阴坡）等方面[52-54]。

基于研发形成的无灌溉植被恢复技术，结合多种防沙技术，创建了固定、半固定沙漠地区工程防护体系建设的优化模式。该技术模式在准噶尔沙漠明渠工程全线（168 km）得到推广应用（图 4），造林面积达 30 000 亩，植物成活率达 85% 以上，防沙体系造价降低了 80% 以上，工程扰动区植被得到迅速恢复，渠道沿线生态环境得到明显改善[55,56]，从而确保了沙漠明渠的顺利施工和安全运行。该技术模式开创了沙漠地区悬湿沙层水的生态利用新途径，拓展了无灌溉造林和生态工程建



① 塔里木盆地西南缘生态综合整治技术服务平台（http://3w.detts.org/Item/6769.aspx）。



图4 古尔班通古特沙漠明渠防护林生态工程

设的技术领域和实施区域，产生了巨大的社会影响。

4 中国交通干线沙害防治技术的国际推广应用前景

世界干旱区和半干旱区约占全球陆地面积的40%[57]，其中荒漠面积3.6×10^7 km^2[57,58]。受气候变化和人类活动的共同影响，全球干旱和半干旱地区，尤其是“一带一路”沿线区域，面临严重的水资源短缺和荒漠化危害问题，这直接危及基础设施建设和安全，特别是交通干线面临严重的风沙危害威胁。“一带一路”六大经济走廊大都存在不同程度的干旱风沙问题，累计约有6 000 km长的风沙危害区段，直接危害铁路、公路、输油输气管线工程和能源资源基地等。

世界各国在交通干线风沙危害防治方面开展了较多试验研究，开发了一些实用技术，但这些技术存在着材料成本较高、措施相对单一、防护效益不佳、使用寿命较短和维护难度较大等问题，其推广应用存在一定的局限性。而针对我国交通干线沿线风沙环境特征，通过技术试验、示范、集成和应用，形成了流动沙漠环境、固定半固定沙漠环境、高寒风沙环境等地区交通干线风沙危害防治模式，并在包兰铁路、青藏铁路、塔里木沙漠公路、准噶尔沙漠明渠及众多沙区交通干线成功应用。这些成套、成熟的技术模式具有低成本、易操作、效益高、寿命长的优点，对全球风沙地区道路防沙及生态建设具有重要参考价值，在世界干旱、半干旱地区尤其是“一带一路”沿线区域具有广阔的应用前景。

参考文献

1 中国公路交通史编审委员会. 中国古代道路交通史. 北京: 人民交通出版社, 1994: 1.

2 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究. 科技导报, 2007, 25(14): 22-27.

3 赵性存. 中国古代沙漠地区的交通开发. 中国沙漠, 1983, 3(2): 15-22.

4 中华人民共和国交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报. [2020-05-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html.

5 刘德基. 我国第一条沙漠铁路. 铁道工程学报, 1996, 13(2): 264-271.

6 刘媖心. 包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益. 中国沙漠, 1987, 7(4): 1-11.

7 康文岩, 王立, 屈建军, 等. 包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟. 中国沙漠, 2020, 40(2): 94-99.

8 冯连昌, 卢继清, 邸耀全. 中国沙区铁路沙害防治综述. 中国沙漠, 1994, 14(2): 47-53.

9 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治. 地理学报, 2003, 58(2): 201- 208.

10 相建民, 李生宇, 买光荣, 等. 塔里木公路防护林生态工程营建与维护. 水土保持通报, 2006, 26(5): 39-42.

11 杨凯, 张小由, 韩致文, 等. 沙漠地区高速公路综合防沙体系研究——以营双高速公路八步沙段为例. 安徽农业科学, 2016, 44(28): 50-52.

12 张乘波. 兰新高速铁路风沙区段挡沙墙设计参数试验研

究. 铁道标准设计, 2016, 60(9): 4-8.

13 荣文文. 内蒙古大塔-何家塔铁路风沙路基综合防护体系. 中国沙漠, 2019, 39(4): 129-138.

14 李鑫, 艾力·斯木吐拉, 陈正奇, 等. 沙漠公路交通事故特征及成因分析. 长沙交通学院学报, 2006, 22(2): 51-55.

15 马广学, 金海鹏. 试探风沙对公路的危害及防治原则. 才智, 2009, (12): 51.

16 钱征宇. 中国沙漠铁路的风沙危害及其防治技术. 中国铁路, 2003, (10): 24-26.

17 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 315国道策勒恰哈桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策.干旱区地理, 2016, 39(4): 754-760.

18 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995: 123.

19 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验. 中国沙漠, 2001, 21(3): 276-280.

20 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地阻沙栅栏对垄间新月形沙丘形态的影响. 干旱区地理, 2008, 31(6): 910-917.

21 李生宇, 雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例. 干旱区研究, 2003, 20(1): 7-10.

22 王世杰, 徐新文, 康向光, 等. 机械防沙体系风沙危害状况及其空间分异——以阿拉尔-和田沙漠公路为例. 干旱区研究, 2015, 32(5): 1017-1023.

23 程鹏, 薛万新, 马韫娟, 等. 高速公路强横风区间新型柔性防风网设计方案研究——以连霍高速百里风区为例. 中国科技信息, 2012, (8): 169-172.

24 薛春晓, 蒋富强, 程建军, 等. 兰新铁路百里风区挡沙墙防沙效益研究. 冰川冻土, 2011, 33(4): 859-862.

25 蔡东旭, 李生宇, 王海峰, 等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1-11.

26 叶彩娟. 高速铁路半封闭防风走廊结构动模型试验研究. 铁道建筑, 2019, 59(4): 152-156.

27 李生宇, 雷加强, 石泽云. DB 65/ T 3590-2014 沙区公路生物防沙体系养护技术规程. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区质量技术监督局, 2014.

28 姚正毅, 陈广庭, 韩致文, 等. 机械防沙体系防沙功能的衰退过程. 中国沙漠, 2006, 26(2): 226-231.

29 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究. 干旱区研究, 2003, 20(1): 1-6.

30 王训明, 陈广庭. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益评价及防沙带合理宽度的初步探讨. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4): 28-35.

31 金昌宁, 董治宝, 李吉均, 等. 公路防沙设计中夸大沙害严重性原因分析. 中国沙漠, 2005, 25(6): 928-932.

32 张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展. 地球科学进展, 2019, 34(6): 573-583.

33 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529-533.

34 王涛等. 中国风沙防治工程. 北京: 科学出版社, 2011.

35 张克存, 屈建军, 姚正毅, 等. 青藏铁路格拉段风沙危害及其防治. 干旱区地理, 2014, 37(1): 74-80.

36 屈建军, 凌裕泉, 刘宝军, 等. 我国风沙防治工程研究现状及发展趋势. 地球科学进展, 2019, 34(3): 225-231.

37 谢胜波, 屈建军, 刘冰, 等. 青藏铁路沙害及其防治研究进展. 中国沙漠, 2014, 34(1): 42-48.

38 任康. 青藏铁路沿线严重沙害区植被恢复措施及恢复效果研究. 北京: 北京林业大学, 2019.

39 罗久富, 郑景明, 周金星, 等. 青藏高原高寒草甸区铁路工程迹地植被恢复过程的种间关联性. 生态学报, 2016, 36(20): 6528-6537.

40 周兴佳, 樊自立. 塔里木沙漠石油公路. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1-18.

41 雷加强, 李生宇, 范冬冬, 等. 塔里木沙漠公路沿线风沙危害形成环境分级与区划. 科学通报, 2008, 53(S2): 1.

42 雷加强. 塔里木沙漠公路风沙危害及其防治研究. 北京: 中

国科学院研究生院, 2003.

43 Lei J Q, Li S Y, Fan D D, et al. Classification and regionalization of the forming environment of windblown sand disasters along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 1-7.

44 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治. 地理学报, 2003, 58(2): 201-208.

45 Li B W, Xu X W, Lei J Q, et al. Site type classification for the shelter-forest ecological project along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 31-40.

46 李红忠, 李生宇, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠不同矿化度水灌溉造林试验研究. 干旱区地理, 2005, 28(3): 305-310.

47 何兴东, 高玉葆, 段争虎, 等. 塔里木沙漠公路植物固沙灌溉方式比较研究. 地理科学, 2002, 22(2): 213-218.

48 杜虎林, 马振武, 熊建国, 等. 塔里木沙漠公路与沙漠油田区域水资源研究及其利用评价. 北京: 海洋出版社, 2005: 153.

49 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991: 97-100.

50 周宏飞, 李彦, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠的积雪及雪融水储存特征. 干旱区研究, 2009, 26(3): 312-317.

51 邓铭江, 王远超, 李江, 等. 沙漠地区大型供水工程建设的关键技术与方法. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3085-3094.

52 钱亦兵, 雷加强, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠风沙土水分垂直分布与受损植被的恢复. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 69-74.

53 朱玉伟, 陈启民, 刘茂秀, 等. 准噶尔盆地南缘无灌溉造林技术研究. 防护林科技, 2009, (2): 3-5, 28.

54 班卫强, 严成, 尹林克, 等. 立地条件和积雪厚度对古尔班通古特沙漠梭梭造林的影响. 中国沙漠, 2012, 32(2): 395-398

55 马学喜, 李生宇, 靳正忠. 流沙地表层土壤化学性质对免灌造林的响应——以古尔班通古特沙漠明渠防护林为例. 水土保持通报, 2015, 35(4): 206-212.

56 王雪芹, 蒋进, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠南部防护体系建成10a来的生境变化与植物自然定居. 中国沙漠, 2012, 32(2): 372-379.

57 Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.

58 国家林业局防治荒漠化管理中心. 国外荒漠化防治. 北京: 中国林业出版社, 2018.

Patterns of Blown-sand Hazard Control for Traffic Arteries in China and Its Application

LI Shengyu[1,2,3,4,6] LEI Jiaqiang[1,2,4,6*] XU Xinwen[1,2,4,6] QU Jianjun[5,6] REN Hongjing[1,2,3,4]

（1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2 National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

3 Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, China;

4 Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla 841000, China;

5 Northwest Institute of Eco-environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

6 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Highways and railways are important infrastructures of land transportation. The blown-sand hazard control of traffic arteries in sandy areas has always been one important issue in the national economy and society. In view of the characteristics of aeolian environment and the demand for safe operation of traffic arteries, China has carried out a large number of sand hazard control experiment and practices mainly on technology innovation of materials, measures, comprehensive system, maintenance, summed up four configuration patterns of sand control system, and created some patterns of sand hazard control technology for desert traffic arteries in different aeolian environments with Chinese characteristics, the patterns have been applied successfully in the Baotou-Lanzhou Railway, Qinghai-Tibet Railway, Tarim Desert Highway and Open Channel in Gurbantunggut Desert. China's achievements in the sand hazard control for land transportation arteries have a broad application prospect in sandy areas in the world, especially in the countries along the Belt and Road.

Keywords highway, railway, blown-sand hazard, sand prevention measures, sand control system



李生宇 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠环境与生态修复研究室主任、莫索湾沙漠研究站站长，教授级高工。中国水土保持学会理事，中国地理学会地貌与第四纪专业委员会委员。新疆维吾尔自治区青年科技创新人才，中国科学院关键技术人才。长期开展风沙地貌与风沙灾害防治的应用基础理论研究以及应用技术和仪器设备开发。

E-mail: oasis@ms.xjb.ac.cn

LI Shengyu Senior Engineer of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (CAS); Director of Desert Environment and Ecological Rehabilitation Research Department; Head of Mosuowan Desert Research Station; Council Member of Chinese Society of Water and Soil Conservation; Member of Geomorphology and Quaternary Committee of Chinese Geographical Society; Young Scientific and Technological Talent of Xinjiang; Key Technical Talent of CAS. He has carried out long-term research on the field of applied basic theories of aeolian landform and

* Corresponding author

blown sand hazard control as well as the development of applied technologies and instruments and equipment.

E-mail: oasis@ms.xjb.ac.cn



雷加强 中国科学院新疆生态与地理研究所创新研究员，博士生导师，泛非“绿色长城”研究中心主任，中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”项目三“重点地区和重要工程的环境问题与灾害风险防控”首席科学家，干旱区防沙治沙与沙产业国家创新联盟理事长，中国治沙暨沙业学会勘察设计研究专业委员会主任。主要从事风沙环境及防沙治沙研究，先后承担国家“973”计划课题、国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金重点项目、国际合作项目等30余项，研究成果获国家科技进步奖二等奖2项、省部级科技进步奖一等奖2项和二等奖8项，享受国务院政府特殊津贴。E-mail: Leijq@ms.xjb.ac.cn

LEI Jiaqiang Professor and Ph.D. Supervisor of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (CAS); Director of “Pan-African Great Green Wall” Research Center; Chief Scientist of “Environmental Issues and Disaster Risk Prevention and Control in Key Areas and Important Projects”, Project 3 of Strategic Priority Research Program of CAS “Pan-Third Pole Environment Study for a Green Silk Road (Pan-TPE)”; Director of National Innovation Alliance of Sand Control and Desert Industry in Arid Areas; Director of Survey and Design Professional Committee of China National Sand Control and Desert Industry Society. He has mainly engaged in the studies on natural geography in Arid Area, aeolian environment and desertification combating. By far, he has presided and fulfilled more than 30 projects, including project of National “973” Program, project of National Key Problem, key projects from CAS and Xinjiang local government. He has achieved 2 second prizes of National S&T Advanced Award, 2 first prizes of Xinjiang S&T Advanced Award and 8 second prizes of Xinjiang S&T Advanced Award. He has been given a special allowance by the State Council. E-mail: Leijq@ms.xjb.ac.cn

■责任编辑：张勇

参考文献（双语版）

1 中国公路交通史编审委员会. 中国古代道路交通史. 北京: 人民交通出版社, 1994: 1.

Editorial Committee of China Highway Traffic History. Road Traffic History in Ancient China. Beijing: China Communications Press, 1994: 1. (in Chinese)

2 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究. 科技导报, 2007, 25(14): 22-27.

Zheng X J. On mechanism of wind-blown sand movement. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 22-27. (in Chinese)

3 赵性存. 中国古代沙漠地区的交通开发. 中国沙漠, 1983, 3(2): 15-22.

Zhao X C. The development of communication in desert regions in ancient China. Journal of Desert Research, 1983, 3(2): 15-22. (in Chinese)

4 中华人民共和国交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报. [2020-05-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2019. [2020-05-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html. (in Chinese)

5 刘德基. 我国第一条沙漠铁路. 铁道工程学报, 1996, 13(2): 264-271.

Liu D J. The first railway line through desert in China. Journal of Railway Engineering Society, 1996, 13(2): 264-271. (in Chinese)

6 刘媖心. 包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益. 中国沙漠, 1987, 7(4): 1-11.

Liu Y X. The establishment and effect of protecting system along the Baotou-Lanzhou Railway in Shapotou sandy area. Journal of Desert Research, 1987, 7(4): 1-11. (in Chinese)

7 康文岩, 王立, 屈建军, 等. 包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟. 中国沙漠, 2020, 40(2): 94-99.

Kang W Y, Wang L, Qu J J, et al. Wind tunnel simulation experiment on the protective effect of different structures of sand-blocking fence in Shapotou section of Baotou-Lanzhou Railway. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 94-99. (in Chinese)

8 冯连昌, 卢继清, 邸耀全. 中国沙区铁路沙害防治综述. 中国沙漠, 1994, 14(3): 47-53.

Feng L C, Lu J Q, Di Y Q. Review on the prevention of sand damages to railway line in desert areas of China. Journal of Desert Research, 1994, 14(3): 47-53. (in Chinese)

9 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治. 地理学报, 2003, 58(2): 201- 208.

Han Z W, Wang T, Sun Q W, et al. Sand harm in Taklimakan desert highway and sand control. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 201- 208. (in Chinese)

10 相建民, 李生宇, 买光荣, 等. 塔里木公路防护林生态工程营建与维护. 水土保持通报, 2006, 26(5): 39-42.

Xiang J M, Li S Y, Mai G R, et al. Construction and maintenance of the shelter-forest project of the Tarim desert highway. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5): 39-42. (in Chinese)

11 杨凯, 张小由, 韩致文, 等. 沙漠地区高速公路综合防沙体系研究——以营双高速公路八步沙段为例. 安徽农业科学, 2016, 44(28): 50-52.

Yang K, Zhang X Y, Han Z W, et al. Study on the sediment control system around the highways in the desert areas—A case study of Babusha section of Yingshuang highway. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(28): 50-52. (in Chinese)

12 张乘波. 兰新高速铁路风沙区段挡沙墙设计参数试验研究. 铁道标准设计, 2016, 60(9): 4-8.

Zhang C B. Experimental study on design parameters of retaining wall for sandstorm section of Lanzhou- Urumqi high-speed railway. Railway Standard Design, 2016, 60(9): 4-8. (in Chinese)

13 荣文文. 内蒙古大塔-何家塔铁路风沙路基综合防护体系. 中国沙漠, 2019, 39(4): 129-138.

Rong W W. Comprehensive protection system for wind-sand subgrade of the Data-Hejiata Railway in Inner Mongolia. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 129-138. (in Chinese)

14 李鑫, 艾力·斯木吐拉, 陈正奇, 等. 沙漠公路交通事故特征及成因分析. 长沙交通学院学报, 2006, 22(2): 51-55.

Li X, Ismutulla Eli, Chen Z Q, et al. Characteristics and effects of desert highway traffic accident. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(2): 51-55. (in Chinese)

15 马广学, 金海鹏. 试探风沙对公路的危害及防治原则. 才智, 2009, (12): 51.

Ma G X, Jin H P. Prevention and control of the harm of sandstorm to highway. Ability and Wisdom, 2009, (12): 51. (in Chinese)

16 钱征宇. 中国沙漠铁路的风沙危害及其防治技术. 中国铁路, 2003, (10): 24-26.

Qian Z Y. The wind-sand damage and its prevention and control technology for Chinese desert railway. Chinese Railways, 2003, (10): 24-26. (in Chinese)

17 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 315国道策勒恰哈桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策. 干旱区地理, 2016, 39(4): 754-760.

Li S Y, Fan J L, Wang H F, et al. Causes and thoughts of comprehensive control of blown sand disaster at Qiaha Bridge of National Highway 315, in Cele County, Xinjiang, Northwest China. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 754-760. (in Chinese)

18 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995: 123.

Liu X W. Experimental Aeolian Physics and Sandstorm Control Engineering. Beijing: Science Press, 1995: 123. (in Chinese)

19 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验. 中国沙漠, 2001, 21(3): 276-280.

Qu J J, Liu X W, Lei J Q, et al. Simulation experiments on sand-arresting effect of nylon net fence in wind tunnel. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 276-280. (in Chinese)

20 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地阻沙栅栏对垄间新月形沙丘形态的影响. 干旱区地理, 2008, 31(6): 910-917.

Li S Y, Lei J Q, Xu X W, et al. Effects of sand blocking fences on morphology of barchans on interdune corridor of complex ridges in the central Taklimakan Desert. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 910-917. (in Chinese)

21 李生宇, 雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例. 干旱区研究, 2003, 20(1): 7-10.

Li S Y, Lei J Q. The ecological restoration functions of the straw-checker sand-barriers-A case study along the desert highways in the Gurbantonggut Desert. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 7-10. (in Chinese)

22 王世杰, 徐新文, 康向光, 等. 机械防沙体系风沙危害状况及其空间分异——以阿拉尔-和田沙漠公路为例. 干旱区研究, 2015, 32(5): 1017-1023.

Wang S J, Xu X W, Kang X G, et al. Blown sand hazard situation and spatial difference of mechanical sand prevention system along alar-hetian desert highway. Arid Zone Research, 2015, 32(5): 1017-1023. (in Chinese)

23 程鹏, 薛万新, 马韫娟, 等. 高速公路强横风区间新型柔性防风网设计方案研究——以连霍高速百里风区为例. 中国科技信息, 2012, (8): 169-172.

Cheng P, Xue W X, Ma Y J, et al. Design of new flexible windbreak network in strong cross-wind section of expressway:

taking Baili wind section of Lianyungang-Horgas Expressway as an example. China Science and Technology Information, 2012, (8): 169-172. (in Chinese)

24 薛春晓, 蒋富强, 程建军, 等. 兰新铁路百里风区挡沙墙防沙效益研究. 冰川冻土, 2011, 33(4): 859-862.

Xue C X, Jiang F Q, Cheng J J, et al. Research on sand preventing benefit of sand retaining wall in a strong wind sector along Lanzhou-Xinjiang railway. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 859-862. (in Chinese)

25 蔡东旭, 李生宇, 王海峰, 等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1-11.

Cai D X, Li S Y, Wang H F, et al. Aeolian hazard and comprehensive protection of S214 highway in Taitema Playa, Xinjiang, China. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 1-11. (in Chinese)

26 叶彩娟. 高速铁路半封闭防风走廊结构动模型试验研究. 铁道建筑, 2019, 59(4): 152-156.

Ye C J. Study on dynamic model test of semi-closed windbreak corridor for high speed railway. Railway Engineering, 2019, 59(4): 152-156. (in Chinese)

27 李生宇, 雷加强, 石泽云. DB 65/ T 3590-2014 沙区公路生物防沙体系养护技术规程. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区质量技术监督局, 2014.

Li S Y, Lei J Q, Shi Z Y. DB 65/T 3590-2014 Technical Regulation for Highway Biological Sand Preventing System Maintenance in Sandy Desert Area. Urumqi: Quality and Technology Supervision Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2014. (in Chinese)

28 姚正毅, 陈广庭, 韩致文, 等. 机械防沙体系防沙功能的衰退过程. 中国沙漠, 2006, 26(2): 226-231.

Yao Z Y, Chen G T, Han Z W, et al. Decline mechanism and process of mechanical defense system. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 226-231. (in Chinese)

29 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究. 干旱区研究, 2003, 20(1): 1-6.

Lei J Q, Wang X Q, Wang D. The formation of the blown sand disaster to the Tarim desert highway, Xinjiang, China. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 1-6. (in Chinese)

30 王训明, 陈广庭. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益评价及防沙带合理宽度的初步探讨. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4): 28-35.

Wang X M, Chen G T. Efficiencies and reasonable width for the mechanical sand-prevention system along the Tarim desert highway. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1997, 11(4): 28-35. (in Chinese)

31 金昌宁, 董治宝, 李吉均, 等. 公路防沙设计中夸大沙害严重性原因分析. 中国沙漠, 2005, 25(6): 928-932.

Jin C N, Dong Z B, Li J J, et al. Analysis on overestimating of blown sand disasters during sand-control designs of highways. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 928-932. (in Chinese)

32 张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展. 地球科学进展, 2019, 34(6): 573-583.

Zhang K C, Qu J J, Yu Y P, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 573-583. (in Chinese)

33 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529-533.

Qu J J, Ling Y Q, Jing Z F, et al. Interaction between sand blown activity and protection system in Shapotou section of Baotou-Lanzhou railway. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 529-533. (in Chinese)

34 王涛等. 中国风沙防治工程. 北京: 科学出版社, 2011.

Wang T, et al. China Sandstorm Control Project. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)

35 张克存, 屈建军, 姚正毅, 等. 青藏铁路格拉段风沙危害及其防治. 干旱区地理, 2014, 37(1): 74-80.

Zhang K C, Qu J J, Yao Z Y, et al. Sand damage and its control

along the Golha section of the Qinghai-Tibet Railway. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 74-80. (in Chinese)

36 屈建军, 凌裕泉, 刘宝军, 等. 我国风沙防治工程研究现状及发展趋势. 地球科学进展, 2019, 34(3): 225-231.
Qu J J, Ling Y Q, Liu B J, et al. The research status and development trends of wind-sand engineering in China. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 225-231. (in Chinese)

37 谢胜波, 屈建军, 刘冰, 等. 青藏铁路沙害及其防治研究进展. 中国沙漠, 2014, 34(1): 42-48.
Xie S B, Qu J J, Liu B, et al. Advances in research on the sand hazards and its controls along the Qinghai-Tibet railway. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 42-48. (in Chinese)

38 任康. 青藏铁路沿线严重沙害区植被恢复措施及恢复效果研究. 北京: 北京林业大学, 2019.
Ren K. Research on vegetation restoration measures and rehabilitation effect in serious sand-damaged areas along Qinghai-Tibet railway. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)

39 罗久富, 郑景明, 周金星, 等. 青藏高原高寒草甸区铁路工程迹地植被恢复过程的种间关联性. 生态学报, 2016, 36(20): 6528-6537.
Luo J F, Zheng J M, Zhou J X, et al. Analysis of the interspecific associations present in an alpine meadow community undergoing revegetation on the railway-construction affected land of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6528-6537. (in Chinese)

40 周兴佳, 樊自立. 塔里木沙漠石油公路. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1-18.
Zhou X J, Fan Z L. Tarim Desert Oil Transportation Highway. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 1-18. (in Chinese)

41 雷加强, 李生宇, 范冬冬, 等. 塔里木沙漠公路沿线风沙危害形成环境分级与区划. 科学通报, 2008, 53(S2): 1.
Lei J Q, Li S Y, Fan D D, et al. Grading and zoning of sandstorm-forming environments along the Tarim Desert highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S2): 1. (in Chinese)

42 雷加强. 塔里木沙漠公路风沙危害及其防治研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
Lei J Q. Sand-blown hazards on Tarim Desert highway and its control. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)

43 Lei J Q, Li S Y, Fan D D, et al. Classification and regionalization of the forming environment of windblown sand disasters along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 1-7.

44 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治. 地理学报, 2003, 58(2): 201-208.
Han Z W, Wang T, Sun Q W, et al. Sand harm in Taklimakan desert highway and sand control. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 201-208. (in Chinese)

45 Li B W, Xu X W, Lei J Q, et al. Site type classification for the shelter-forest ecological project along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 31-40.

46 李红忠, 李生宇, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠不同矿化度水灌溉造林试验研究. 干旱区地理, 2005, 28(3): 305-310.
Li H Z, Li S Y, Lei J Q, et al. Experimental study on afforestation irrigated with saltwater with different mineralizations in the Taklimakan desert. Arid Land Geography, 2005, 28(3): 305-310. (in Chinese)

47 何兴东, 高玉葆, 段争虎, 等. 塔里木沙漠公路植物固沙灌溉方式比较研究. 地理科学, 2002, 22(2): 213-218.
He X D, Gao Y B, Duan Z H, et al. The comparison of irrigation manners for constructing sand-fixing plantation along Tarim Desert highway. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(2): 213-218. (in Chinese)

48 杜虎林, 马振武, 熊建国, 等. 塔里木沙漠公路与沙漠油田区域水资源研究及其利用评价. 北京: 海洋出版社, 2005: 153.

Du H L, Ma Z W, Xiong J G, et al. Research and Utilization of Water Resources Along Tarim Desert Highway and in the Desert Oilfield. Beijing: China Ocean Press, 2005: 153. (in Chinese)

49 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991: 97-100.

Li J F. Xinjiang Climate. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 97-100. (in Chinese)

50 周宏飞, 李彦, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠的积雪及雪融水储存特征. 干旱区研究, 2009, 26(3): 312-317.

Zhou H F, Li Y, Tang Y, et al. The characteristics of the snow-cover and snowmelt water storage in Gurbantunggut desert. Arid Zone Research, 2009, 26(3): 312-317. (in Chinese)

51 邓铭江, 王远超, 李江, 等. 沙漠地区大型供水工程建设的关键技术与方法. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3085-3094.

Deng M J, Wang Y C, Li J, et al. Key methodologies for constructing large-scale water supply canals in desert. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3085-3094. (in Chinese)

52 钱亦兵, 雷加强, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠风沙土水分垂直分布与受损植被的恢复. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 69-74.

Qian Y B, Lei J Q, Wu Z N. Vertical distribution of aeolian sandy soil moisture and recovery of damaged vegetation in Gurbantunggut desert. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(4): 69-74. (in Chinese)

53 朱玉伟, 陈启民, 刘茂秀, 等. 准噶尔盆地南缘无灌溉造林技术研究. 防护林科技, 2009, (2): 3-5.

Zhu Y W, Chen Q M, Liu M X, et al. Non-irrigation afforestation in southern margin of Zhunger basin. Protection Forest Science and Technology, 2009, (2): 3-5. (in Chinese)

54 班卫强, 严成, 尹林克, 等. 立地条件和积雪厚度对古尔班通古特沙漠梭梭造林的影响. 中国沙漠, 2012, 32(2): 395-398.

Ban W Q, Yan C, Yin L K, et al. Effects of site condition and snow depth on Haloxyon ammodendron afforestation in Gurbantunggut desert. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 395-398. (in Chinese)

55 马学喜, 李生宇, 靳正忠. 流沙地表层土壤化学性质对免灌造林的响应——以古尔班通古特沙漠明渠防护林为例. 水土保持通报, 2015, 35(4): 206-212.

Ma X X, Li S Y, Jin Z Z. Response of soil chemical properties to afforestation in surface of shifting sand—A case study on shelterbelt of open channel in Gurbantunggut desert. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 206-212. (in Chinese)

56 王雪芹, 蒋进, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠南部防护体系建成10a来的生境变化与植物自然定居. 中国沙漠, 2012, 32(2): 372-379.

Wang X Q, Jiang J, Zhang Y M, et al. Habitat change and natural establishment of plants in the southern part of Gurbantunggut desert, China during 10 years since construction of engineering protective system. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 372-379. (in Chinese)

57 Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.

58 国家林业局防治荒漠化管理中心. 国外荒漠化防治. 北京: 中国林业出版社, 2018.

Center for Combating Desertification, State Forestry Administration. Combat Desertification Abroad. Beijing: China Forestry Publishing House, 2018. (in Chinese)